

УДК 621.314

С. М. Левицький, канд. техн. наук, доц.;

К. І. Колмачов, студ.

## КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРАМИ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

Розроблено комп'ютерну модель системи керування трансформаторами з інтелектуальним регулятором, яка відрізняється від відомих врахуванням ресурсу пристроїв перемикання відгалужень трансформаторів та варіативною затримкою на проведення перемикання, що дозволяє дослідити на стійкість замкнені системи керування та вдосконалити базу знань нечіткої математичної моделі визначення стану пристроїв перемикання відгалужень.

### Постановка завдання

Першочерговим завданням перед розрахунком та технічною реалізацією такого класу нелінійних динамічних систем, як системи керування силовими трансформаторами, є дослідження їх на стійкість та визначення параметрів налагодження, що відповідають стійкому режиму.

### Аналіз останніх досліджень

Одним з ключових варіантів побудови систем автоматичного керування (САК) трансформаторами, який забезпечує високу точність регулювання напруги та водночас дозволяє економно використовувати ресурс пристроїв перемикання регульованих відгалужень, є використання такого закону регулювання, в якому враховується похідна обвідної напруги на шинах підстанції. Такий закон регулювання розроблено в роботі [1]. Він має вигляд

$$u(t) = K_1 \cdot ((U(t) - U_y) - K_2 ((I(t) - I_{\min}));$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.3}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u_{н.3} < u(t) < u_{в.3}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.3}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.3}; \\ \frac{dU_{ог}}{dt} \geq 0, \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

де  $K_m$  — коефіцієнт трансформації трансформатора з РПН;  $u(t)$  — приведена напруга на шинах підстанції з урахуванням струмової компенсації;  $u_{н.3}$ ,  $u_{в.3}$  — нижня і верхня границі зони нечутливості, які задаються з умов надійності;  $U_y$  — уставка регулятора, яка відповідає номінальній напрузі  $U_{ном}$  — на шинах підстанції;  $U(t)$  — поточне значення цієї напруги;  $I_{\min}$  — струм, що знімається з шин підстанції в режимі мінімуму навантаження;  $I(t)$  — поточне значення цього струму;  $U_{н.н}$  — напруга на шинах низької напруги трансформатора;  $U_i$  — напруга, що індукуюється в

обмотці високої напруги трансформатора у разі підключення  $i$ -го відгалуження;  $K_1$  — коефіцієнт, який характеризує чутливість регулятора;  $K_2$  — коефіцієнт, який визначає нахил характеристики зустрічного регулювання;  $\tau_3$  — час затримки сигналу;  $dU_{ог}/dt$  — похідна обвідної контрольованої напруги;  $\Delta U = u_{в,3} - U_{ном} = U_{ном} - u_{н,3}$ ;  $u_{в,3l}$ ,  $u_{н,3l}$  — верхня і нижня границі зони нечутливості, зумовленої якістю регулювання напруги.

В роботах [2, 3] для дослідження вказаного закону розроблено комп'ютерні моделі систем автоматичного керування силовими трансформаторами з пристроями перемикання регулювальних відгалужень під навантаженням (РПН), однак в законах керування досліджуваних систем не враховується стан пристроїв РПН, який суттєво впливає на їх надійність. В роботі [4] проведено оцінювання регулювальної здатності трансформаторів з РПН з урахуванням їх ресурсу, однак відсутні розробки та пропозиції щодо подальшого застосування оцінки як в системах діагностування, так і в САК. Комп'ютерна модель автоматичного регулятора напруги на рівні технічної деталізації розроблена в роботі [5]. Ця модель дозволяє провести оцінку стійкості замкненої системи керування трансформаторами, але в роботі відсутня структура бази знань та правила для визначення стану пристроїв РПН-трансформаторів.

### Конкретизація завдання

В роботі [6] запропоновано апаратну та програмну реалізацію САК трансформаторами з пристроями РПН з інтелектуальним регулятором, однак для дослідження її на стійкість та визначення параметрів налагодження *потрібно* розробити комп'ютерну модель усієї системи та регулятора зокрема. Розроблена модель додатково має надавати можливість доповнювати, коректувати базу знань нечіткої моделі блока оцінювання стану пристрою РПН-трансформатора.

### Матеріали дослідження

Автоматичний регулятор системи керування трансформаторами, яка розроблена в роботі [5], описується законом (1), в якому параметр  $\tau_3$  визначається моделлю

$$\tau_3 = \text{fuzzy}(I, \text{tg } \delta, W, C, \text{CO}_2, C_n H_m, R), \quad (2)$$

де fuzzy — оператор нечіткого логічного висновку;  $I_d$  — струм електродвигуна приводу;  $\text{tg } \delta$  — тангенс кута діелектричних втрат трансформаторного масла;  $W$  — вміст вологи в маслі;  $C$  — ємність масла;  $C_n H_m$  — вміст розчинених газів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$  (найбільше змінюється вміст в процесі зносу пристрою РПН);  $R$  — перехідний опір контактів.

Структура САК трансформатором, яка функціонує у відповідності до закону керування (1), показана на рис. 1.

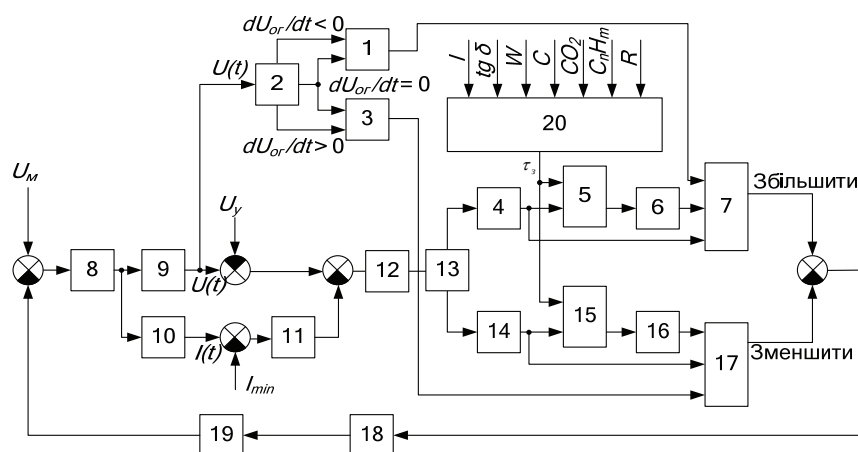


Рис. 1. Структурна схема САК трансформатором з інтелектуальним регулятором:

1, 3 — елементи «АБО»; 2 — блок визначення знака похідної обвідної напруги на навантаженні; 4, 14 — перетворювачі імпульсного сигналу в потенційний; 5, 15 — блоки часової затримки; 6, 16 — імпульсні елементи; 7, 17 — елементи «І»; 8 — електрична мережа; 9 — вимірювальний канал напруги на вводах споживачів; 10 — вимірювальний канал струму навантаження підстанції; 11 — масштаботвор; 12 — підсилювач; 13 — пороговий блок; 18 — електропривод пристрою перемикання відгалужень ТПР; 19 — перемикаючий пристрій; 20 — fuzzy-контролер

Для оцінки стійкості системи використовують різні критерії [7]. Досліджувати стійкість системи автоматичного керування трансформаторами з пристроями РПН за допомогою традиційних критеріїв стійкості досить складно, оскільки вона є суттєво нелінійною. Тому оцінку стійкості такої системи автоматичного регулювання доцільно поєднати з оцінкою якості її перехідних процесів, які у випадку стійкої системи є загасальними. В свою чергу перехідний процес в системі зручно оцінювати за її перехідною характеристикою, знятою для найбільших можливих стрибків сигналу збудження.

Для комп'ютерного моделювання застосуємо пакет прикладних програм (ППП) MatLab Simulink [8].

Припустимо, що система керування трансформатором встановлена на підстанції 110/10 кВ, для моделювання задаємо значення зони нечутливості регулятора на рівні  $\pm 5\%$  за напругою. Загальна модель такої системи, розроблена в середовищі Matlab Simulink, показана на рис. 2. Комп'ютерна модель системи складається з моделей автоматичного регулятора, пристрою РПН, силового трансформатора, мережі.

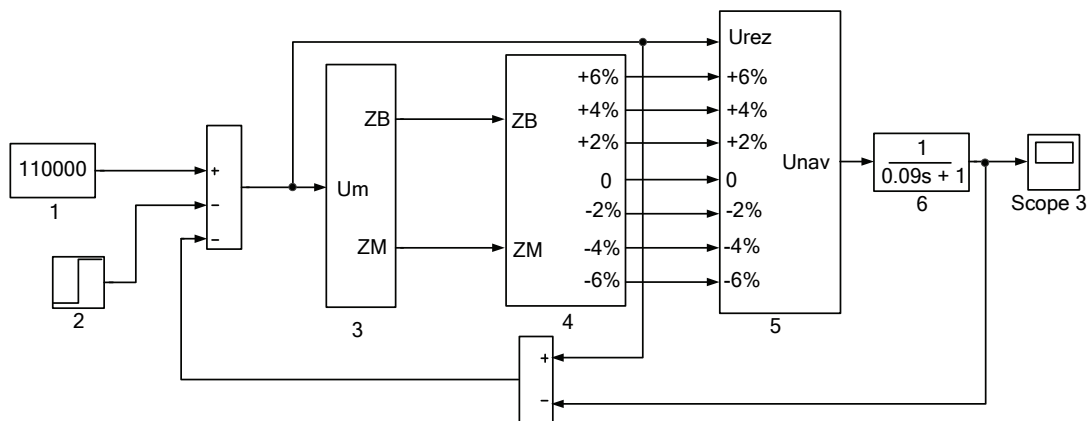


Рис. 2. Модель системи регулювання напруги трансформаторної підстанції з інтелектуальним регулятором: 1 — блок завдання значення напруги розподільчої мережі; 2 — блок моделювання збудження; 3 — модель регулятора напруги з інтелектуальним регулятором; 4 — модель пристрою РПН силового трансформатора; 5 — модель силового трансформатора; 6 — модель електричної мережі

Модель регулятора напруги з керованою затримкою часу показана на рис. 3. Вихідним сигналом регулятора є імпульси на виходах логічних блоків «І» в тракті регулювання напруги на навантаженні (ZB та ZM).

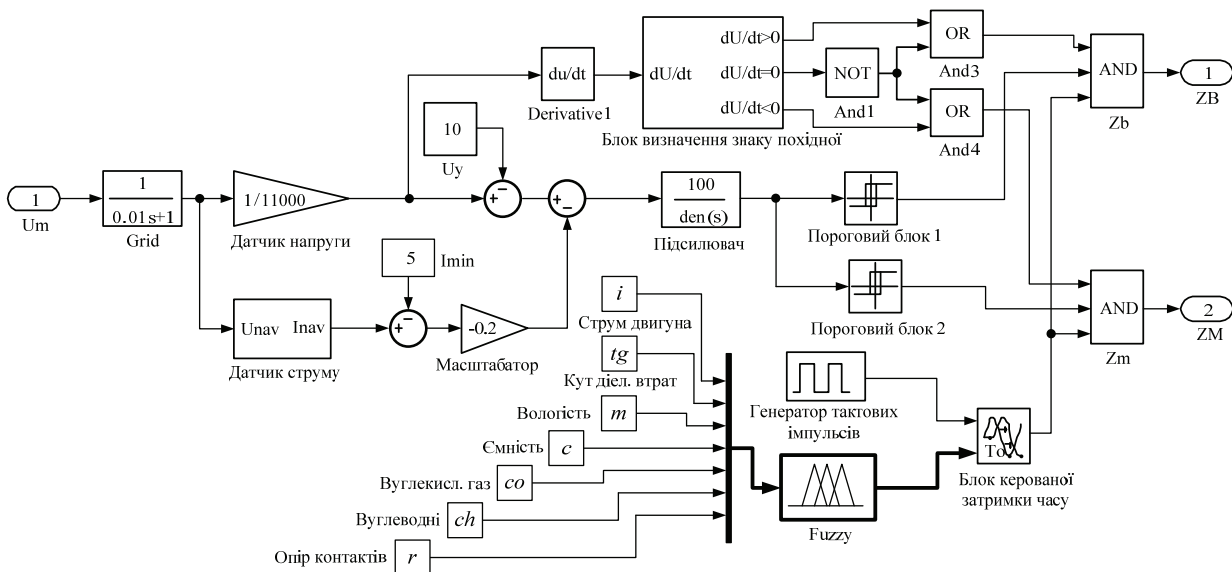


Рис. 3. Модель автоматичного регулятора напруги з керованою затримкою часу

Блоки «Датчик напруги» та «Датчик струму» в комп'ютерній моделі імітують роботу відповідних датчиків системи керування трансформатором. В об'єкті датчики перетворюють вхідну вели-

чину в уніфікований сигнал або передають інформацію по цифровому інтерфейсу, в моделі це забезпечується блоками математичних операцій типу Math [8]. Визначення знака похідної здійснюється за допомогою спеціального блока, що реалізовано за допомогою вбудованих в середовище Simulink моделей диференціатора та компараторів.

Струм навантаження є одним із збурень в тракті регулювання напруги. Обчислення цього параметра відбувається за використання блоку «Датчик струму», елементна будова якого така сама, як і в роботі [5].

В загальному суматорі порівнюються сигнали з виходів датчика струму та напруги з напругою уставки регулятора та формується сигнал розузгодження системи. Підсилювачем забезпечується підсилення та фільтрування короточасних коливань вхідного сигналу розузгодження, що викликані шумами в трактах вимірювання. В моделі підсилювач представлений як аперіодична ланка першого порядку. Підсилений та фільтрований сигнал розузгодження надходить на порогові блоки, які в моделі реалізовано за допомогою блоків типу Relay [8]. У разі зниження сигналу розузгодження нижче значення зони нечутливості спрацьовує «Пороговий блок 2» і на його виході з'являється сигнал логічної 1. Зі збільшенням сигналу розузгодження за значення зони нечутливості спрацьовує «Пороговий блок 1».

Оскільки далі принцип побудови ланцюгів формування команди «Збільшити» та «Зменшити» однаковий, то розглянемо один з цих ланцюгів керування, наприклад, «Зменшити». Після релейного елемента «Пороговий блок 2» сигнал надходить на вхід логічного елемента  $Zm$  типу AND, який періодично відкривається тактовими імпульсами з генератора, період яких встановлюється «Блоком керованої затримки часу».

Блок часової затримки реалізовано за допомогою елемента Variable Transport Delay [8], що має два входи: перший вхід — це вхід імпульсів заданої шпаруватості, а другий вхід призначений для обчислення затримки між передніми фронтами імпульсів.

Сигнал для формування керованої затримки часу надходить від блока Fuzzy, що містить в собі нечіткий регулятор та сім датчиків стану. Нечіткий регулятор робить висновок на основі сигналів з датчиків. В табл. 1 наведено нечітку базу знань, на основі якої працює регулятор.

Таблиця 1

База правил блоку нечіткого висновку про стан пристрою перемикання відгалужень

№ п/п	Вхідні змінні							Вихідна змінна
	$X_1 (I)$	$X_2 (\lg \delta)$	$X_3 (W)$	$X_4 (C)$	$X_5 (CO_2)$	$X_6 (C_nH_m)$	$X_7 (R)$	Y
	1,0...2,5 A	2,0...4,2 %	10...25 г/т	8...16 пФ	1800...4000 мкл/л	45...180 мкл/л	16...20 мкОм	
1	Н	Н	Н	Н	Н	Н	Н	$t_1$
2	Н	Н	С	Н	С	Н	Н	
3	Н	Н	С	Н	С	С	Н	
4	Н	С	С	С	С	С	С	$t_3$
5	С	С	С	С	С	С	С	$t_4$
6	С	С	ВС	С	С	С	С	$t_5$
7	С	ВС	ВС	С	С	ВС	С	$t_6$
8	С	В	ВС	С	С	ВС	С	$t_7$
9	ВС	В	ВС	С	С	ВС	С	$t_8$
10	ВС	В	ВС	В	В	ВС	В	$t_9$
11	ВС	В	ВС	В	В	В	В	$t_9$
12	В	В	В	В	В	В	В	

Комп'ютерна модель пристрою РПН розроблена з використанням набору тригерних елементів J-K Flip-Flap [8], які реалізують функцію реверсивного лічильника імпульсів, крок якого відповідає номеру регульовального ступеня трансформатора.

Результати моделювання показано на рис. 4—6. На діаграмах:  $U_{\text{мер}}(t)$  — напруга мережі, кВ;  $U_{\text{нав}}(t)$  — напруга на навантаженні. В табл. 2—4 наведено параметри вхідних даних від датчиків стану, на основі яких формується варіативна затримка часу.

Таблиця 2

**Вхідні параметри від датчиків стану для «нового» пристрою РПН**

$X_1 (I)$	$X_2 (\text{tg } \delta)$	$X_3 (W)$	$X_4 (C)$	$X_5 (\text{CO}_2)$	$X_6 (\text{C}_n\text{H}_m)$	$X_7 (R)$
1,5	2,1	14	11	2050	87,5	16,4

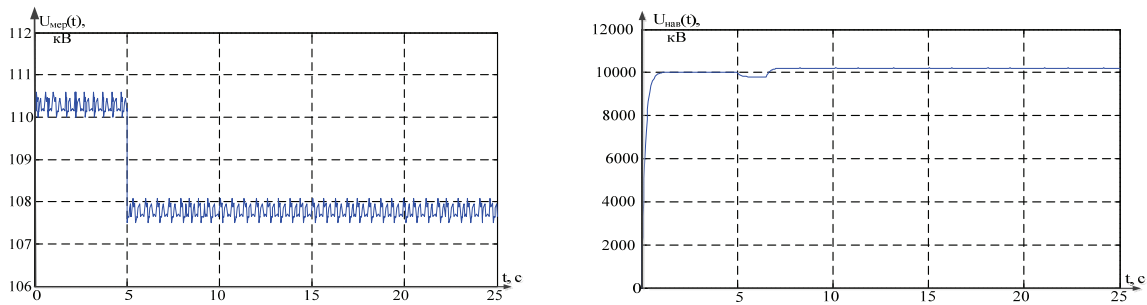


Рис. 4. Діаграма роботи системи регулювання для «нового» пристрою РПН у разі ступінчатої зміни напруги мережі від 110 до 107,5 кВ

Таблиця 3

**Вхідні параметри від датчиків стану для пристрою РПН, що знаходиться в роботі**

$X_1 (I)$	$X_2 (\text{tg } \delta)$	$X_3 (W)$	$X_4 (C)$	$X_5 (\text{CO}_2)$	$X_6 (\text{C}_n\text{H}_m)$	$X_7 (R)$
2,2	3	12,3	15,6	2650	156	17

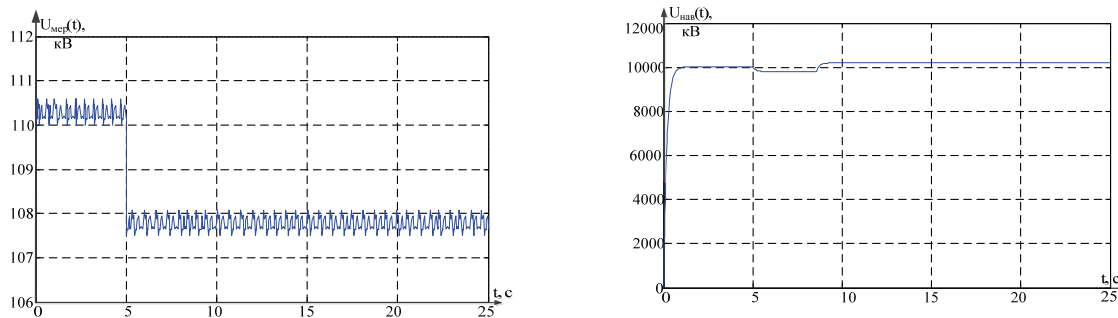


Рис. 5. Діаграма роботи системи регулювання для пристрою РПН, що знаходиться в експлуатації у разі ступінчатої зміни напруги мережі від 110—107,5 кВ

Таблиця 4

**Вхідні параметри від датчиків стану для «зношеного» пристрою РПН**

$X_1 (I)$	$X_2 (\text{tg } \delta)$	$X_3 (W)$	$X_4 (C)$	$X_5 (\text{CO}_2)$	$X_6 (\text{C}_n\text{H}_m)$	$X_7 (R)$
2,5	4,2	23	15	3850	170	19

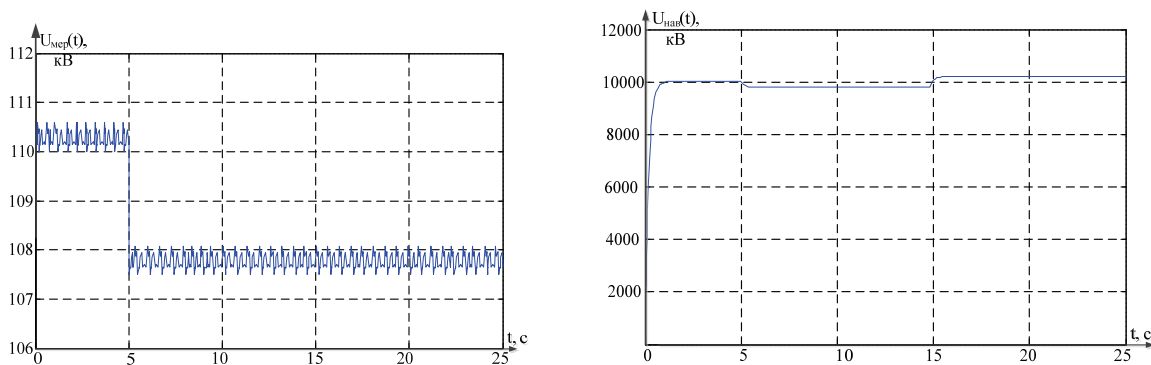


Рис. 6. Діаграма роботи системи регулювання для «зношеного» пристрою РПН у разі ступінчатої зміни напруги мережі від 110—107,5 кВ

Блок визначення затримки на проведення перемикаання Fuzzy описується в комп'ютерній моделі функціями належності Гаусса (3), що відповідають нормальному закону розподілу належності вхідної величини до вибраних термів згідно з центральною граничною теоремою:

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right), \quad (3)$$

де  $b$  — координата максимуму;  $c$  — коефіцієнт концентрації.

Для вказаних у табл. 1 правил нечіткого логічного висновку та отриманих діаграм очевидно, що затримка  $\tau_z$  на проведення перемикаання пристроєм РПН для стану «зношений» (див. рис. 6) перевищує затримку на проведення перемикаання «новим» пристроєм РПН (див. рис. 4) в п'ять разів. За вказаний приріст часу в реальному часі рівновага між заданим та фактичним значеннями напруги на шинах підстанції може відновитися, що дозволить уникнути зайвого перемикаання «зношеним» пристроєм РПН. Водночас для високих показників технічних характеристик пристроїв РПН, які відносяться до класу «нових», невелика затримка на проведення перемикаання робить систему динамічнішою, а якість регулювання напруги — вищою.

### Висновки

1. Запропоновано математичну модель автоматичного регулятора САК трансформатором з РПН, що відрізняється від відомих керованою затримкою на перемикаання в функції стану зношеності пристрою РПН і дозволяє покращити надійність САК та якість електроенергії на вводах споживачів.

2. Розроблено комп'ютерну модель автоматичного регулятора САК трансформатором з формуванням варіативної затримки сигналу перемикаання на підставі нечіткого логічного висновку з оцінки параметрів стану РПН. Модель дозволяє встановити уставку регулятора та його швидкодію, що забезпечують стійкість замкненої системи керування трансформатором, а також формувати, коректувати та доповнювати базу знань.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. — К. : Техника, 1985. — 104 с.
2. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : моногр. / В. В. Грабко. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 109 с. — ISBN 966-641-115-6.
3. Жорняк Л. Б. Исследование методов моделирования работы системы регулирования напряжения силового трансформатора с устройством РПН для повышения качества электроснабжения потребителей электроэнергии / Л. Б. Жорняк, В. И. Осинская // Электротехника та электромеханика, 2007. — № 4. — С. 15—22.
4. Калюжный Д. Н. Оценка регулировочной способности двухобмоточных трансформаторов с регулированием под нагрузкой / Д. Н. Калюжный // Світлотехніка та електроенергетика, 2006. — № 7—8. — С. 65—69.
5. Левицький С. М. Комп'ютерне моделювання системи регулювання напруги в умовах дефіциту реактивної потужності / С. М. Левицький // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2007. — № 6. — С. 80—83.
6. Грабко В. В. Система віддаленого керування пристроєм регулювання під навантаженням трансформаторної підстанції / В. В. Грабко, С. М. Левицький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — № 2/2011(14). — С. 42—45. — ISSN 2072-2052.
7. Юхимчук С. В. Автоматизация проектирования систем автоматического управления : учеб. пос. [для студ. вузов] / С. В. Юхимчук, В. Н. Лысогор, В. Ю. Марущак. — К. : УМВО, 1989. — 172 с.
8. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. — СПб. : Питер, 2002. — 528 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів

Стаття надійшла до редакції 22.03.2013

Рекомендована до друку 15.04.2013

**Левицький Сергій Михайлович** — доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті;

**Колмачов Костянтин Ігорович** — студент Інституту електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця